59　山腹斜面における地下水位変動予測のための飽和不飽和浸透流計算モデルの提示と適用例

東京大学大学院　○白木克繁
東京大学農学部　　鈴木雅一
東京大学農学部　　太田猛彦

1．はじめに

斜面崩壊発生の理論的解明や、崩壊発生予測、または危険度を定量的に評価するためには、土壌中の水の挙動を再現し予測することが重要な課題になる。このためには、土壌中の水の挙動を支配する Richards 式を3次元で解けばよいが、この式は特殊な場合を除いて解析解がなく、数値計算上の困難性も多々あり、実際の流域スケールで長期間にわたり計算された例は少ない。森林斜面を対象とした土中水移動解析を数値計算によって行う場合の困難性として、2点の解決すべき問題がある。一つは水移動の基礎式である Richards 式を離散化して差分解法、有限要素法などを用いて計算する場合の、時間空間刻みの問題であり、もう一つは複雑な3次元地形を持つ実流域へ計算を適用する場合の計算時間の問題である。筆者らは、これらの問題を解消でき、森林流域での土壌中の水移動を再現できる計算手法（**水収支陽解法**）を開発中である。昨年度の砂防学会の研究発表において、この計算手法の概略と、2次元断面計算で斜面ライシメーター流出を精度よく再現できることを発表した。今回の発表ではこの計算手法を、既往の手法と比較するのと同時に、森林流域での適用例を示し、この計算手法が実用的であることを示す。

2．数値計算上の困難性

日野（1989）はϕベースの Richards 式を離散化し、差分解法により数値計算する場合の空間刻み時間刻みの条件を検討した。これに従えば、森林土壌の場合非常に細かな空間刻み時間刻みを設定しなければならないことがわかる。仮に空間刻みについて、条件より大きな値を採用した場合、離散化による計算誤差が顕著に現れることになる。特に湿潤前線近傍ではϕの変化が急激であり、ϕの変化に伴う$C(\phi)$の変化の見積もりに誤差が生じる。このため適切でない時間刻み、空間刻みでおこなったϕベースの陰解法は水収支誤差が発生し、場合によっては計算不能になる。これは差分法でも有限要素法でも同様に起きる現象であると言われている。

空間刻みをを十分細かくとったときの問題点は、計算容量、時間ともに膨大になり、実用性がなくなることが挙げられる。

3．水収支陽解法の概要と既往の手法との比較

本計算手法は、1995年砂防学会研究発表で紹介しているので要点のみ記述する。

計算モデル構築にあたり、以下の点を目標とする。

a.　3次元に容易に拡張できる。

b.　計算時間が短く、かつ水収支誤差を生じない。

c.　粗い空間刻み、時間刻みにおいて概略値を算出できる。

この目的のため、以下のような計算手法を展開する。

Ⅰ．水収支計算ではθで、流出量の計算ではϕを用いる。正圧値については上方のセルがいくつ飽和しているかで決定する。

Ⅱ．高速に計算でき、3次元へ拡張の容易である、陽的なスキームを用いる。この際計算値が振動、発散しない工夫をする。（表1）

Ⅲ．2つのセル間（たとえばセルAからセルB）での流量をダルシー則で求めるが、この時の透水係数を算出するϕは、$(\phi_A+\phi_B)/2$のかわりにϕ_Aを用いる。

上記のⅠは水収支誤差を生まない工夫であり、Ⅱは陽的スキームでの計算値を安定させる計算技法である。これらは十分細かい時間刻み空間刻みをとれば Richards 式から逸脱しない。Ⅲは、湿潤前線近傍での水移動を計算可能にするための計算技法であるが、

セルAからセルXへの流出の計算

○ステップ1：θをϕに読み替える　○ステップ2：隣接するセルへの流量Qxの計算

○ステップ3：水収支を合わせる

この時それぞれのセルにポテンシャル流動量とでも呼ぶべき量Pを導入し、次の手続きを行う。

---- セルAからの流出

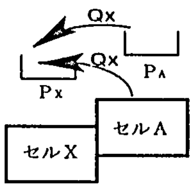
if $(P_A \geq Qx)$　　$P_A \leftarrow P_A - Qx$

if $(P_A < Qx)$　　$P_A \leftarrow 0.0$ and

θを$Qx - P_A$に相当する分減少させる

---- セルXへの流入

$Px \leftarrow Px + Qx$



ここでPn：n方向に隣接する周辺セルのPである。

技法1．ステップ1から3を2回繰り返し、その平均を計算流量とする。

技法2．上流側より計算する。

技法3．すべてのセルの計算が終了した時点で、それぞれのセルのPをθに換算する。

表1　陽的スキームでの計算の工夫

Richards 式との若干の誤差が生じる。特にϕ_Aとϕ_Bに大きな差が生じるときに誤差が大きくなる。これについて、日野の示す条件を満たしている差分陰解法（これを正しい数値解であるとみなす）と水収支陽解法（刻み密と粗）とを比較した。鉛直1次元計算を対象として、乾燥した土壌への雨水の浸透により湿潤前線が発生する条件を例に取ると、図1左図のようになり、鉛直プロファイルでの誤差が生じる。しかし図1右図に示すとおり、地下水位の発生とその上昇過程は正確に表現できている。ここで斜面での水移動過程では、鉛直に浸透した雨水が基盤面に達した後、飽和帯の発生により斜面方向への速い流出成分を形成することを考慮すると、この計算手法による誤差は最小限におさえられていると言えよう。

さらに、水収支陽解法は基本的にθを変数として扱っており、飽和時の表現について技術的な手法を使用しているので、２次元断面での飽和帯の形成過程についての正解性を検討した。4面を不透水層で囲まれた断面で、地下水位が形成される過程を同様に比較したとき、それぞれの対応はよかった（図省略）。

以上２例から、水収支陽解法では粗い刻みでも連続計算が可能で、概略値を表現できることが言える。

４．自然流域への適用と計算結果

計算対象とした流域は、東京大学愛知演習林白坂流域内南谷小流域谷頭部（0.45ha）である（図２）。基岩は風化花崗岩である。計算を適用する際には、測定された地形形状と土壌深をそのまま取り入れた。今回の計算では、平面的には２ｍ×２ｍに分割し、鉛直方向へ一律土壌深を４分割することで３次元計算を行った。この時、対象となる流域を 1129×４個に分割することになる。計算する上で、基岩への深部浸透は考慮しなかった。また、一つのカラムがすべて飽和した場合を表面流発生とし、超過分を時間差無しで下流へ流出させる、などの条件を設けた。下流端では表面流の発生をもって流出量とした。蒸発散による損失量計算に単純なモデルを組み入れ、計算期間での水収支をあわせた。

計算結果の例として、図２に示した地点での地下水位変動を図３に示す。これらの例より水収支陽解法が、Richards 式の概略計算ができ、実流域スケールでも計算が可能で、かつ実際の地下水位変動（発生の予測を含む）をおおよそ再現でき、実用性の高い計算モデルであることが示された。

○参考文献：日野幹雄ほか“洪水の数値予報”森北出版 pp. 217～226

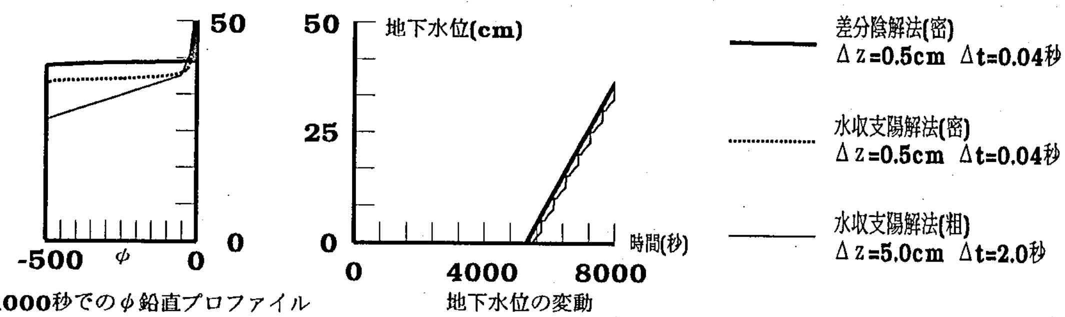


図１　乾燥土壌への雨水の浸透（初期値-500cmH2O、降雨強度 50mm/hour での１次元計算）

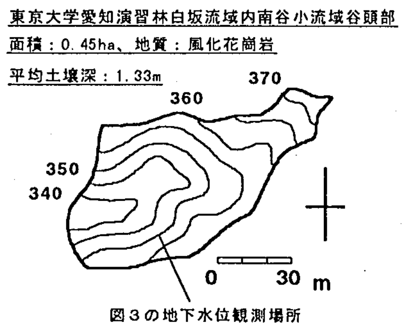


図２　計算を適用した流域

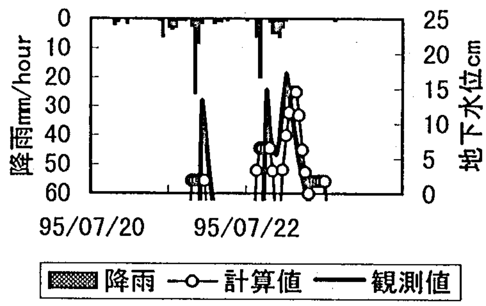


図３　地下水位の変動